

## 2. 非晶态固体的超声研究

由于非晶态固体的短程无序,使得定量的理论研究长期无从下手,直到1971年Heinicke的超声实验和 Zeller, Pohl 的热力学实验发现非晶态固体的异常性质<sup>[4,5]</sup>后,这个领域的实验和理论研究才迅速活跃起来。

在液氮以上的温区,各种玻璃的超声衰减异常主要是在液氮温度附近有一大衰减峰  $P_1$ , 在10K以下呈现一肩。此特征与玻璃的种类和杂质的存在无关。对于四面体结构的玻璃,在  $P_1$  峰温稍高点的温度,声速出现极小值。在液氮以下温区,超声衰减与声功率的关系出现饱和现象,即在很高或很低的声强下,超声衰减与声功率无关。声速变化在1.5K以上与频率有关,在1.5K以下与频率无关,并随温度的下降而单调减少。为了解释这些超声异常,Anderson 和 Phillips 提出了唯象解释,他们认为在玻璃中普遍存在着两能级系统(TLS)<sup>[14,15]</sup>。声子和 TLS 之间的相互作用发生了共振吸收,同时超声波通过大量的 TLS 时,扰动了它们的平衡而导致弛豫吸收。在4K以下的声速异常也可用共振吸收和弛豫吸收来解释。

对非晶态快离子导体的研究表明,在液氮至室温的温区,存在着宽而强的超声衰减峰和明显的声速变化异常。超声衰减峰已证实为热激活弛豫过程,声速异常可用非简谐的共振吸

收和弛豫吸收说明<sup>[16-18]</sup>。

## 3. 高温氧化物超导材料的超声研究

自高  $T_c$  超导材料问世以来,人们试图找出超导转变与超声特性之间的关系,如同对传统超导体 BCS 理论那样。至今所得到的主要结果是在 Y 系和 Bi 系超导体材中,在240K附近发现结构相变,实验证实此相变与超导转变无关<sup>[19]</sup>。

- [1] H. E. Bömmel, *Phys. Rev.*, **98**(1954), 220.
- [2] R. W. Morse and H. V. Bohm, *Phys. Rev.*, **108**(1958), 1094.
- [3] R. W. Morse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **3**(1959), 15.
- [4] W. Heinicke et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, **48**(1971), 954.
- [5] R. C. Zeller and R. O. Pohl, *Phys. Rev. B*, **4**(1971), 2029.
- [6] L. Mackinnon, *Phys. Rev.*, **98**(1955), 1181.
- [7] L. Mackinnon, *Phys. Rev.*, **98**(1955), 1210.
- [8] J. Bardeen et al., *Phys. Rev.*, **108**(1957), 1175.
- [9] L. N. Cooper, *Phys. Rev. Lett.*, **3**(1959), 17.
- [10] 张谦琳, *声学学报*, **14**(1989), 220.
- [11] J. O. Fossum and K. F. Fosheim, *J. Phys. C*, **18**(1985), 5549.
- [12] J. O. Fossum, *J. Phys. C*, **18**(1985), 5531.
- [13] J. Hu et al., *Phys. Rev. B*, **39**(1986), 6331.
- [14] P. W. Anderson et al., *Philos. Mag.*, **25**(1972), 1.
- [15] W. A. Phillips, *J. Low. Temp. Phys.*, **7**(1972), 351.
- [16] G. Carini et al., *Phys. Rev. B*, **30**(1984), 7219.
- [17] G. Carini et al., *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 8264.
- [18] J. Hu et al., *The 14th ICA Proceeding A10-2*, (1992).
- [19] J. Hu et al., *Physica C*, **162-164**(1989), 444.

# 固体内耗新模型和分形、混沌

王养璞 金其淑

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

在介绍固体内耗新模型及其应用的基础上,分析了弛豫慢化来源于相空间中运输的“粘连性”或分形上的自相似结构,阐述了新模型的物理基础基于非线性动力学的研究。

自1985年第八届国际固体内耗和超声衰减会议召开以来,内耗的研究在我国已取得许多进展<sup>[1]</sup>,对内耗机理的研究正在深入。80年

代,金属玻璃中的内耗实验峰的研究逐渐增多。典型的如钽硅非晶合金中氢引起的增宽的不对称的内耗峰,它们不能用德拜理论解释。当时

流行的一种做法是采用“弛豫时间分布”或“激活能分布”来拟合不对称的内耗峰。这种未知的分布缺乏理论分析和实验证实。为此，我们把 Ngai 的弛豫理论引入到内耗研究中来，并给不对称内耗峰以新的解释<sup>[2]</sup>。依此我们对各种非晶态固体（如非晶合金、超离子导体、磁性玻璃等）中的多种滞弹性弛豫过程进行研究，探索了多种内耗峰的微观机制、弛豫规律以及内耗公式<sup>[3,4]</sup>。在此基础上，在第九届国际固体内耗和超声衰减会议上，我们提出了一个新的固体内耗模型<sup>[5]</sup>，称为耦合滞弹性模型<sup>[6]</sup>。新模型对“标准滞弹性模型”作了重要改进和推广。新模型的主要特点是：考虑到弛豫粒子之间的相互作用（或相关性），将速率方程中的常数弛豫率改为与时间有关的弛豫率，使之适用于非晶态固体（玻璃、金属玻璃、超离子导体、聚合物等）中的多种滞弹性弛豫过程（如点缺陷弛豫、磁弹性弛豫和热弹性弛豫等）。新模型不仅得到了许多对内耗研究有用的结果，而且蕴含深刻的物理内容。为对固体内耗的机理进行深入的研究，本文先从非晶态固体的特性入手，然后引入新模型并导出有关公式，再用近代物理理论讨论新模型的物理基础。

## 一、非晶态固体与新模型

玻璃与晶体同样具有高度的短程序，它们都是化学键共同维持固体的结果。因此，晶体中的一些概念（如弹性偶极子、序参量、原始弛豫粒子、弛豫速率  $\omega_0$  等）也可引入到非晶态固体的内耗研究中去。但是在结构上，非晶态固体与晶体的本质区别是不存在长程有序，没有平移周期性。非晶态结构的三种主要模型是：无规密堆积、连续无规网络和无规线团模型。这些无规都是指统计意义上的。非晶态固体存在着大量“缺陷”，或者结构本身也是拓扑无序的。我们在研究其中的弛豫粒子运动时，不仅要考虑它受到热源的作用，还要考虑弛豫粒子之间的相互作用即弛豫粒子间的相关性，使弛豫速率慢化。我们引入一个新模型——耦合滞

物理

弹性模型<sup>[5,6]</sup>，它由下列方程定义：

$$\varepsilon(\sigma, \xi) = J_0 \sigma + K \xi, \quad (1)$$

$$\dot{\xi} = \mu \sigma, \quad (2)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = -\omega(t)(\xi - \bar{\xi}) = -a(\xi - \bar{\xi})t^{-n} \quad (0 < n \leq 1), \quad (3)$$

式中  $\xi$  为内参量，它是一个短程的序参量。(3) 式是内参量的速率方程，其中弛豫速率  $\omega(t)$  随时间作  $t^{-n}$  的幂指数衰减， $n$  为耦合参量。由新模型可导出以下各式：

(1) 非德拜应变弛豫（或弛豫函数）为

$$\delta\varepsilon = \delta\varepsilon_0 \exp[-(t/\tau^*)^{1-n}] \quad (0 < n < 1, \omega_c t \geq 1), \quad (4)$$

它与普适的 K-W-W 弛豫的规律一致。

(2) 有效弛豫时间为

$$\tau^* = [(1-n)t_c^{-n}\tau_0]^{1/(1-n)}. \quad (5)$$

(3) 激活能重整化关系为

$$E_\lambda^* = E_\lambda / (1-n). \quad (6)$$

(4) 在高温下，若满足条件  $\omega_c t \leq 1$ ，仍有德拜指数弛豫为

$$\delta\varepsilon = \delta\varepsilon_0 \exp(-t/\tau_0). \quad (7)$$

(5) 耦合滞弹性体的非德拜内耗峰为<sup>[5]</sup>

$$Q^{-1} = \pi \Delta \omega \tau^* Q_{1-n}(\omega \tau^*), \quad (8)$$

按温度分布的内耗峰为

$$Q^{-1} = A' \beta \omega \exp(E_\lambda^*/kT) Q_{1-n}[\omega \tau_\infty \exp(E_\lambda^*/kT)]. \quad (9)$$

以上这些公式适用于非晶态固体（如金属玻璃、快离子导体、磁性玻璃、聚合物等）的多种滞弹性过程。因此，新模型对新材料的内耗研究，即新材料的机械性能及与之有关的热性能、磁性能等的探索和开发具有重要作用。

## 二、新模型与分形、混沌

新模型中对复杂的多体相互作用用一个简单的与时间有关的弛豫率反映出来，表现了新模型的数学表述既简单明了，又有丰富的物理内涵，其关键的问题是要对耦合参量  $n$  进行深入的研究，以阐明新模型的物理基础。这可根据非晶态固体所用的近代理论来进行考察。逾

渗理论是处理强无序和具有随机几何结构的系统的理论方法之一,非晶态固体的拓扑无序便成为应用逾渗理论的一个富有成果的领域。逾渗概念应用于非晶态固体的两个突出例子是玻璃化转变和安德孙转变。从逾渗固体的滞弹性的应变弛豫实验,求得了符合(4)式的非德拜的应变弛豫曲线<sup>[7]</sup>。我们认为,由实验可以独立地求得了耦合参量 $n$ (对内耗峰曲线的拟合),而由理论也可从反常扩散中求得耦合参量 $n$ 与无规行走的分维数(行走分维) $d_w$ 的关系为 $n = 1 - \frac{2}{d_w}$ 。快离子导体中的超声吸收也可用分形概念进行研究。可以说,在一些非晶态固体中,分形结构上的自相似性是造成反常运输的根源。

由于聚合物链节间的相互作用,缠结聚合物的哈密顿量为不可积问题,系统相空间中有规则 and 混沌的两个区域的混合,而且有散置于混沌区域内的小岛的无限谱系(或分层)<sup>[8]</sup>。起初在某个混沌区域的一个粒子能够长时间地逗留在有规区域边界的邻域,因此运输减慢。有规区域的这种“粘连性”,是系统运输的基本方

面。Ngai 等的研究指出,复杂相互作用(相关)系统中弛豫过程可用混沌动力学来阐述,可给出耦合参量 $n$ 的力学解释, $n = \delta - 1$ , $\delta$ 为动力学指数,它可由两个近似的标度常数 $a_0$ 和 $b_0$ 决定。 $a_0$ 和 $b_0$ 分别表示 Bethe tree 相继两个有序态的通量比和“体积”比<sup>[9]</sup>。

分形、混沌已经构成现代非线性科学中具有共性的基本概念。只有利用这些概念才可能把耦合参量 $n$ 的理论和实验研究深入下去,新模型的物理基础正是基于非线性动力学的研究。

- [1] 葛庭燧,物理,16(1987),547.
- [2] Wang Yangpu and Gao Guoru, *J. de Physique*, C10 (1985), 465.
- [3] 王养璞、金其淑,物理学报,37(1988),1083.
- [4] 王养璞、金其淑,物理学报,37(1988),1401.
- [5] 王养璞、金其淑, Proceeding of the 9th International Conference on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids, International Academic Publishers, (1990), 199.
- [6] 王养璞、金其淑,第三届全国固体内耗会议论文集,原子能出版社,(1992).
- [7] M. Ghosh et al., *Phys Rev. B*, 41 (1990), 731.
- [8] K. L. Ngai et al., *J. Non-Crystalline Solids*, 131 (1991), 233.

## 位错晶界与点缺陷交互作用引起的非线性、非稳定和 非德拜型弛豫的理论方向

孙宗琦

(中国科学院金属研究所,沈阳 110015)

位错的滑移和晶界的滑动有相似之处,例如它们的元过程都是产生弹性位移偶极,都需克服一定位垒。本文用对比的方法分析了它们的微观机理。

当葛庭燧在 40 年代内耗开创时期研究晶界和位错的滑动引起的内耗时<sup>[1-3]</sup>,晶界内耗是作为典型的德拜型(标准线性固体)弛豫现象来处理,而位错滑移内耗的非线性、非稳定即非德

拜型特征格外受到葛的垂青。50 年代,GL 位错弦钉扎模型大获全胜,曾一度摆脱了德拜型弛豫的框框。以后,由于点缺陷弛豫弹性偶极理论,特别是 Nowick 专著<sup>[4]</sup>的影响,人们已习惯于用德拜型弛豫的观点来讨论一切内耗现象。因此,这里也从德拜弛豫开始。

位错是线缺陷,晶界是面缺陷。描述它们的运动的规律应该分别采用一和二维的积分微